

УДК 615.47

## УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОРТАТИВНОГО СПИРОМЕТРА С ТУРБИННЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПОТОКА

*Р. С. ТОМАШЕВСКИЙ*

В статье дано описание измерительной части портативного спирометра, реализованной на турбинном преобразователе потока, и приведены уравнения движения чувствительного элемента – лепестков ротора. В ходе работы предложены и обоснованы способы уменьшения интервалов дискретизации измеряемой величины. Путем анализа уравнений движения получены зависимости для определения размеров основных элементов конструкции при реализации предложенных способов.

In the paper the measurement part of a portable spirometer to be sold in the turbine flow transducer is described, and the equations of motion sensitive part (the rotor blades) are given. During the work proposed and justified ways to reduce the sampling interval of the measured value. Also, by analyzing the equations of motion are obtained according to sizing the main structural elements in the implementation of the proposed methods.

### ВВЕДЕНИЕ

Под термином спирометрия понимают метод исследования функции внешнего дыхания, суть которого состоит в измерении объемов и расходов на различных этапах дыхательного маневра пациента. Наиболее клинически значимые сведения дает анализ экспираторного маневра (выдоха). Особое внимание уделяется средствам индивидуального и скринингового контроля населения, к которым в первую очередь относятся портативные спирометры. Повышение качества портативных спирометров в настоящее время, является актуальной задачей и дальнейшее ее решение перспективно [1]. В первую очередь это касается совершенствования измерительной части спирометра и повышению его информативности. К техническим параметрам, по которым можно оценить качество измерительной части, можно отнести чувствительность, точность и полосу пропускания частот входного сигнала.

Метод измерения расхода с помощью турбинного преобразователя потока (ТПП) предполагает преобразование объемной скорости движущегося воздуха во вращение ротора, с последующим преобразованием его угловой скорости в частоту следования импульсов. Так как в конструкции датчика необходимо обеспечить минимальную нагрузку на вал ротора [2], в спирометрической аппаратуре используется неконтактные способы преобразования угловая скорость – частота.

В общем случае, такое преобразование может быть реализовано с помощью современных преобразователей угла поворота ротора – энкодеров. Они подразделяются на инкрементальные и абсолютные и могут достигать очень высокого разрешения до 10000 дискрет на один оборот.

К сожалению, использование подобных устройств в спирометрической аппаратуре сопряжено с рядом трудностей (в большинстве случаев невозможно). Применение их в аксиальных турбинах ограничено

конструктивными особенностями – конструкция оптического энкодера предполагает расположение дополнительных элементов на роторе турбины, что приводит к увеличению момента инерции. Кроме того внесение частей энкодера в рабочую часть турбины приводит к увеличению пневматического сопротивления и существенно усложнению санитарной обработки.

Наиболее перспективными для портативного спирометра с турбинным преобразователем потока являются фотоэлектрические тахометры [3]. Принцип работы таких тахометров основан на прерывании или отражении светового луча элементом ротора. При его вращении происходит модуляция светового потока, который подается на фотоприемный элемент. Также следует отметить, что фотоэлектрический способ измерения угловой скорости не накладывает на ротор, каких либо ограничений, связанных с его массой и материалом изготовления.

Особенностью тахометров является то, что информационным параметром выходного сигнала является частота сигнала. С одной стороны частотно модулированный сигнал обладает высокой помехоустойчивостью [4]. С другой стороны теоретически невозможно определить мгновенное значение частоты, так как она вычисляется как величина обратная периоду, который в свою очередь представляет собой временной интервал между двумя характерными точками сигнала, например фронтами импульсов. Такой прием приводит к усреднению частоты за определенное время – интервал дискретизации. Уменьшение интервала дискретизации дает возможность повысить разрешающую способность тахометра и расширить полосу пропускания входного сигнала [5].

Целью данной работы является реализация и обоснование способа улучшения технических показателей портативного спирометра с турбинным преобразователем потока, в основе которого лежит определение усредненных значений объемной скорости воздушного потока на интервалах меньших, чем период

вращения ротора.

## 1. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ИНТЕРВАЛА ДИСКРЕТИЗАЦИИ

В качестве конструкции (рис. 1) ТПП будет рассмотрена та, которая активно применяется ведущими производителями спирометрической аппаратуры – Medical International Research, Shiller и др.

Буквенными обозначениями на рис. 1 показаны: т. А и т. D – точки вхождения инфракрасного (ИК) луча через поверхность корпуса измерительной турбины; т. С и т. F – точки выхода ИК луча; т. О – геометрический центр турбины, полюс (при рассмотрении в полярной системе координат); ОВ и ОЕ – перпендикуляры, опущенные из т. О на отрезки АС и DF соответственно; т. X<sub>1</sub> и X<sub>2</sub> – точки, соответствующие краям лепестков ротора; ОУ – полярная ось, α – угол между полярной осью и отрезком ОX<sub>1</sub>; γ – угол между ОВ и ОЕ. Примем ОX<sub>1</sub> = r<sub>1</sub>, ОX<sub>2</sub> = r<sub>2</sub>, ОВ = L<sub>1</sub>, ОЕ = L<sub>2</sub>.

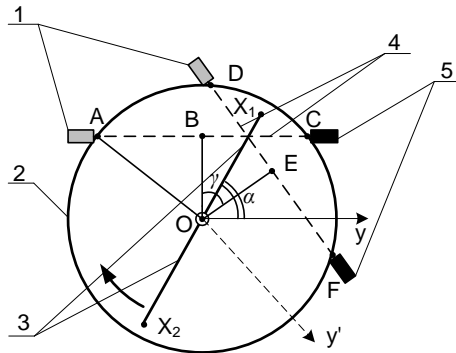


Рис. 1. Базовая конструкция ТПП

- 1 – светоизлучающие диоды;
- 2 – прозрачный корпус измерительной турбины;
- 3 – лепестки ротора;
- 4 – траектории ИК лучей;
- 5 – фотоприемники.

Несмотря на наличие двух оптических пар, в качестве тахометрического устройства используется лишь одна (АС), другая (DF) служит для определения направления вращения ротора. Рассмотрим работу такого преобразователя в статическом режиме, т.е. при постоянной объемной скорости.

Движение ротора может быть описано функциями  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  перемещения точек X<sub>1</sub> и X<sub>2</sub> относительно полярной оси ОУ. Тогда при постоянной угловой скорости ( $\omega = \text{const}$ ) в параметрическом виде получим:

$$\begin{cases} x_1(t) = r_1 \cdot \sin(\alpha(t) + \pi) \\ x_2(t) = r_2 \cdot \sin(\alpha(t)) \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha(t) = \omega t$ .

Лепестки ротора, пересекая ИК луч на отрезке АС (см. рис. 2, а), модулируют световой поток и на выходе фотоприемников (ФП) формируется электрический сигнал (рис 2, б)

$$u_{\text{ФП}}(t) = \begin{cases} "1", & \text{если } x_1(t) \geq L_1 \wedge x_2(t) \geq L_1 \\ "0", & \text{если } x_1(t) < L_1 \vee x_2(t) < L_1. \end{cases} \quad (2)$$

Затем по фронту выходных импульсов  $u_{\text{ФП}}$  формирователь прямоугольных импульсов (ФИ) формирует

короткие импульсы через временные интервалы  $T_1$  и  $T_2$  (см. рис. 2, в) за один оборот ротора  $T_{\text{об}}$ .

Однако точное измерение расхода за время равное половине периода вращения ротора возможно лишь при условии равенства интервалов  $T_1$  и  $T_2$ . Это может быть обеспечено при выполнении условия равенства длин лепестков

$$r_1 = r_2. \quad (3)$$

Таким образом, интервал дискретизации в рассмотренном случае будет равен  $T_{\text{об}}/2$  (коэффициент передачи ТПП  $k = 2$ ). Уменьшение интервала дискретизации до  $T_{\text{об}}/4$  ( $k = 4$ ) возможно при использовании в качестве информационных параметров фронтов и срезов импульсов  $u'_{\text{ФП}}(t)$  (см. рис. 2, з). Равенство периодов  $T_1 - T_4$  обеспечивается выполнением условий 3 и 4.

$$L_1 = r_1 \cos \frac{\pi}{4}. \quad (4)$$

Дальнейшее уменьшение интервала дискретизации реализуется при использовании дополнительной оптической пары (DF) в качестве элемента тахометрического преобразователя. При этом коэффициент передачи ТПП  $k = 8$ . Уравнения движения ротора относительно ИК луча DF (см. рис. 3, б) можно получить, совершив переход в другую полярную систему координат ОУ', которая сдвинута относительно ОУ на угол γ.

$$\begin{cases} x'_1(t) = r_1 \cdot \sin(\alpha(t) + \pi + \gamma) \\ x'_2(t) = r_2 \cdot \sin(\alpha(t) + \gamma) \end{cases} \quad (5)$$

Тогда выходной сигнал ФП (см. рис. 3, в и з), будет состоять из сигналов  $u_{\text{ФП1}}(t) = u_{\text{ФП}}(t)$  (см. выр. 2) и  $u_{\text{ФП2}}(t)$  формируемыми первым и вторым фотоприемником:

$$u_{\text{ФП2}}(t) = \begin{cases} "1", & \text{если } x'_1(t) \geq L_2 \wedge x'_2(t) \geq L_2 \\ "0", & \text{если } x'_1(t) < L_2 \vee x'_2(t) < L_2. \end{cases} \quad (6)$$

Для обеспечения равенства периодов  $T_1 - T_8$  выходного сигнала ФИ (рис. 3, д) необходимо выполнения (кроме 3 и 4) еще двух условий

$$L_2 = r_1 \cos \frac{\pi}{4}; \quad (7)$$

$$\gamma = \pi / 4. \quad (8)$$

Следует подчеркнуть, что эти условия получены путем анализа уравнений 2, 6 и геометрических соотношений элементов базовой конструкции (рис. 1).

Дальнейшее уменьшение интервала дискретизации принципиально возможно двумя способами:

- за счет увеличения количества лепестков ротора;
- за счет увеличения количества оптических пар излучатель – фотоприемник.

Обеспечение равенства периодов следования информационных импульсов может быть выполнено применением при конструировании ТПП соотношений 9 – 11, которые являются обобщенными вариантами 3, 4, 7, 8.

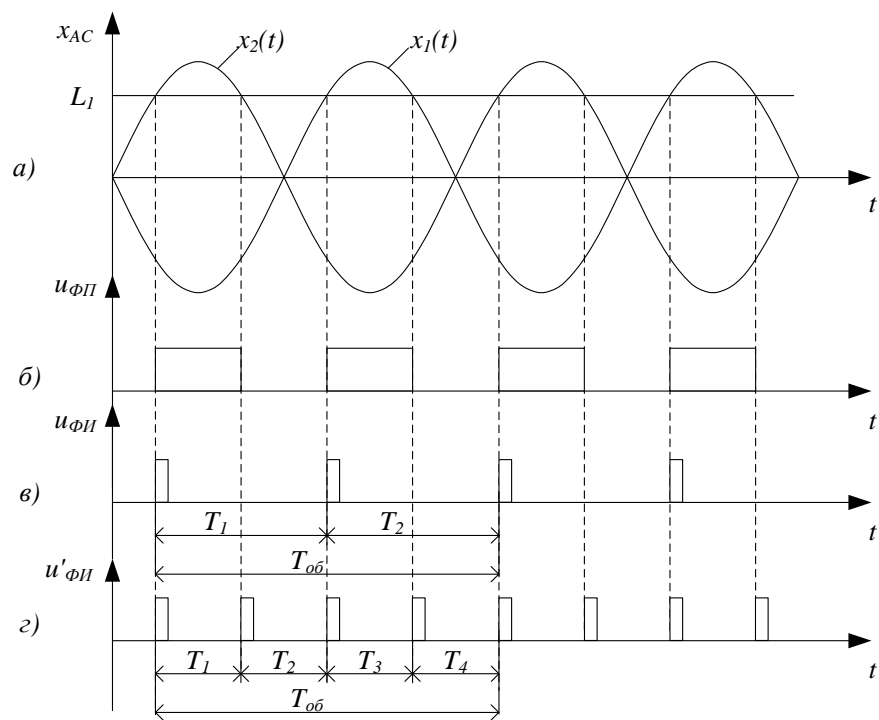


Рис. 2. Временные диаграммы работы ТПП с использованием одной оптической пары

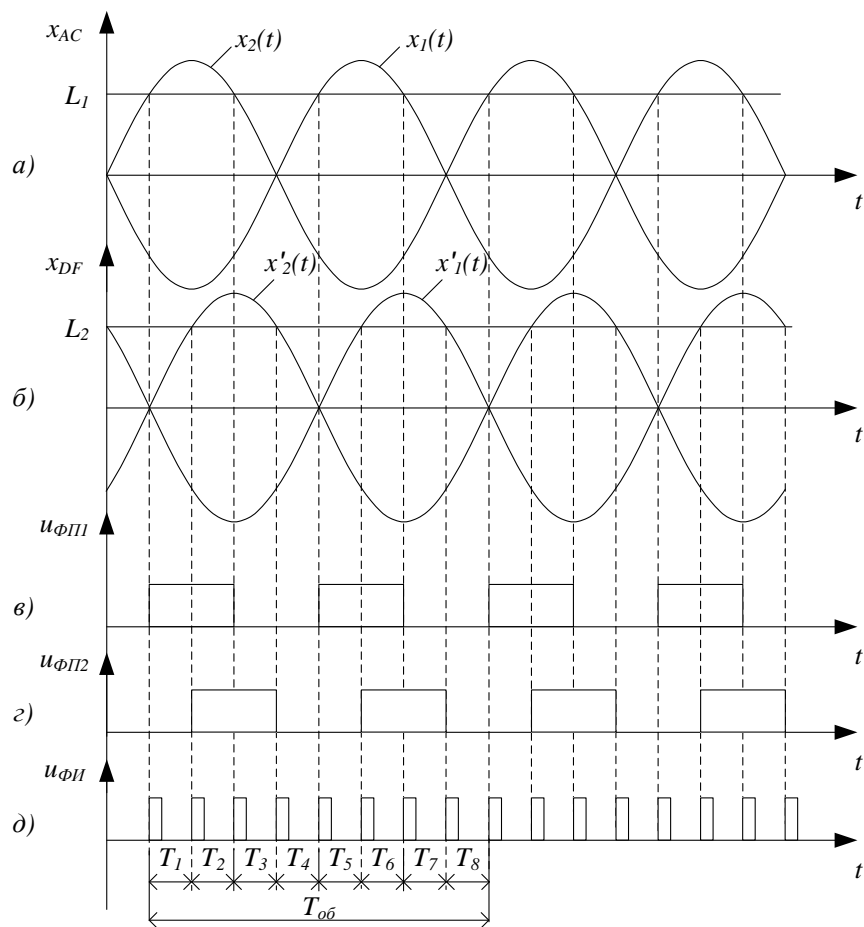


Рис. 3. Временные диаграммы работы ТПП при использовании двух оптических пар

$$r = \sum_{i=1}^n r_i / l; \quad (9)$$

$$L = r \cdot \cos \frac{\pi}{2 \cdot l}; \quad (10)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{m \cdot l}, \quad (11)$$

где  $l$  – количество лепестков ротора;  
 $m$  – количество оптических пар.

Эти способы могут в равной степени быть использованы для повышения технико-эксплуатационных показателей портативных спирометров, однако при их применении следует учитывать, что при увеличении количества лепестков пропорционально возрастает масса ротора, а при увеличении количества оптических пар необходимо включать в расчет угол освещения светодиода во избежание перекрестной засветки.

## 2. АНАЛИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

При производстве спирометрической аппаратуры следует помнить, что технологический разброс параметров неизбежен, и это может существенно повлиять на результат преобразования. Поэтому для корректного использования предложенных способов уменьшения интервала дискретизации необходимо детальное исследование влияния разброса на точность преобразования.

Рассмотрим влияние технологического разброса параметров на инструментальную погрешность  $\sigma_i$  в случае использования двух оптических пар ( $k = 8$ ), которая связана с отличием полученных интервалов  $T_i$  и расчетных  $T_{об}/8$

$$\sigma_i = \frac{T_i - T_{об}/8}{T_{об}/8}. \quad (12)$$

Согласно условиям 9, 10, 11 значение инструментальной погрешности будет состоять из четырех элементов

$$\sigma_i = \sigma_{ri} + \sigma_{L1i} + \sigma_{L2i} + \sigma_{\gamma i}, \quad (13)$$

где  $\sigma_{ri}$  – погрешность преобразования, вызванная неравенством длин лепестков,  $\sigma_{L1i}$  – вызванная отклонением в соотношении длинны лепестка и расположения элементов первой оптической пары,  $\sigma_{L2i}$  – вызванная отклонением в соотношении длинны лепестка и расположения элементов второй оптической пары,  $\sigma_{\gamma i}$  – вызванная отклонением взаимного расположения оптических пар.

Отклонение значения периода  $T_i$  можно записать как функцию нескольких переменных:

$$\sigma_i = f(\Delta r^*, \Delta L_1^*, \Delta L_2^*, \Delta \gamma^*), \quad (14)$$

где  $\Delta r^* = (r_1 - r_2)/r_1$  – относительная разница в длинах лепестков;

$\Delta L_1^* = (L_1 - r_1 \cos(\pi/2))/r_1 \cos(\pi/2)$  – относительное отклонение в расположении элементов оптической пары;

$\Delta L_2^* = (L_2 - r_1 \cos(\pi/2))/r_1 \cos(\pi/2)$  – относительное от-

клонение в расположении элементов оптической пары;

$\Delta \gamma^* = 4(\gamma - \pi/4)/\pi$  – относительное отклонение во взаимном расположении оптических пар.

Для оценки влияния каждой из этих составляющих и их в целом на результат преобразования решим уравнения 1 и 5 в точках пересечения ИК луча и лепестков

$$\begin{cases} L_1 = r_1 \sin \omega t \\ L_2 = r_1 \sin(\omega t - \gamma) \\ L_1 = r_2 \sin(\omega t - \pi) \\ L_2 = r_2 \sin(\omega t - \pi - \gamma) \end{cases} \quad (15)$$

относительно  $t$  и выразим интервалы  $T_1 - T_8$ :

$$\begin{cases} T_1 = (\arcsin \frac{L_2}{r_1} + \gamma - \arcsin \frac{L_1}{r_1}) / \omega; \\ T_2 = (-\arcsin \frac{L_1}{r_1} + \pi - \arcsin \frac{L_2}{r_1} - \gamma) / \omega; \\ T_3 = (-\arcsin \frac{L_2}{r_1} + \gamma + \arcsin \frac{L_1}{r_1}) / \omega; \\ T_4 = (\arcsin \frac{L_1}{r_2} - \gamma + \arcsin \frac{L_2}{r_1}) / \omega; \\ T_5 = (\arcsin \frac{L_2}{r_2} + \gamma - \arcsin \frac{L_1}{r_2}) / \omega; \\ T_6 = (-\arcsin \frac{L_1}{r_2} - \gamma + \pi - \arcsin \frac{L_2}{r_2}) / \omega; \\ T_7 = (-\arcsin \frac{L_2}{r_2} + \gamma - \arcsin \frac{L_1}{r_2}) / \omega; \\ T_8 = (\arcsin \frac{L_1}{r_1} - \gamma + \arcsin \frac{L_2}{r_2}) / \omega. \end{cases}$$

На основании выражений в приложении MathCad была создана математическая модель преобразования угловой скорости вращения ротора в импульсную последовательность с информационным параметром  $T_i$ . В разработанной модели была введена возможность варьирования ключевых геометрических размеров  $r_1, r_2, L_1, L_2, \gamma$  в зависимости от допуска для номинальных размеров при изготовлении вплоть до  $\pm 0,05$ . Результаты серии экспериментов представлены в виде графических зависимостей наибольшей инструментальной погрешности преобразований  $\sigma_{max}$  от величин отклонений  $\Delta^*$  приведенных в выр. 14. Также приведены результаты исследований для погрешности преобразования частоты

$$\delta f = 2\pi(\omega k / 2\pi - 1/T) / \omega k \quad (16)$$

следования импульсов  $f = 1/T$ , так как именно частота является информационным параметром пропорциональным скорости  $Q$  воздушного потока.

Проведенные исследования показали, что наибольшее влияние на результат преобразования имеет отклонение в размерах лепестков ротора. При относительном отклонении этих длин друг от друга  $\pm 0,05$  значение инструментальной погрешности преобразования  $\sigma_{max}$  (рис. 4, а) составило от -0,14 до 0,12, а значение погрешности преобразования частоты  $\delta f$  (рис. 4, б) составило от - 0,11 до 0,16. Влияние отклонений  $\Delta L^*$  и  $\Delta \gamma^*$  оказалось менее значимым

( $\Delta L^* = \Delta L_1^* = \Delta L_2^*$  так как их влияние на результат преобразования одинаковый). Также были проведены исследования комплексного влияния отклонений основных геометрических соотношений, на рис 4, в и г изображены результаты погрешностей преобразования временных интервалов и частоты соответственно при наихудших случаях разброса параметров ТПП.

На основании проведенных исследований установлено, что при теоретически возможном разбросе  $\pm 0,05$  наибольшее значение погрешности преобразования временного интервала составило  $-0,17$ , а частоты  $0,2$ . На практике для исключения этого влияния рекомендуется применять программные методы корректировки результатов преобразования [6].

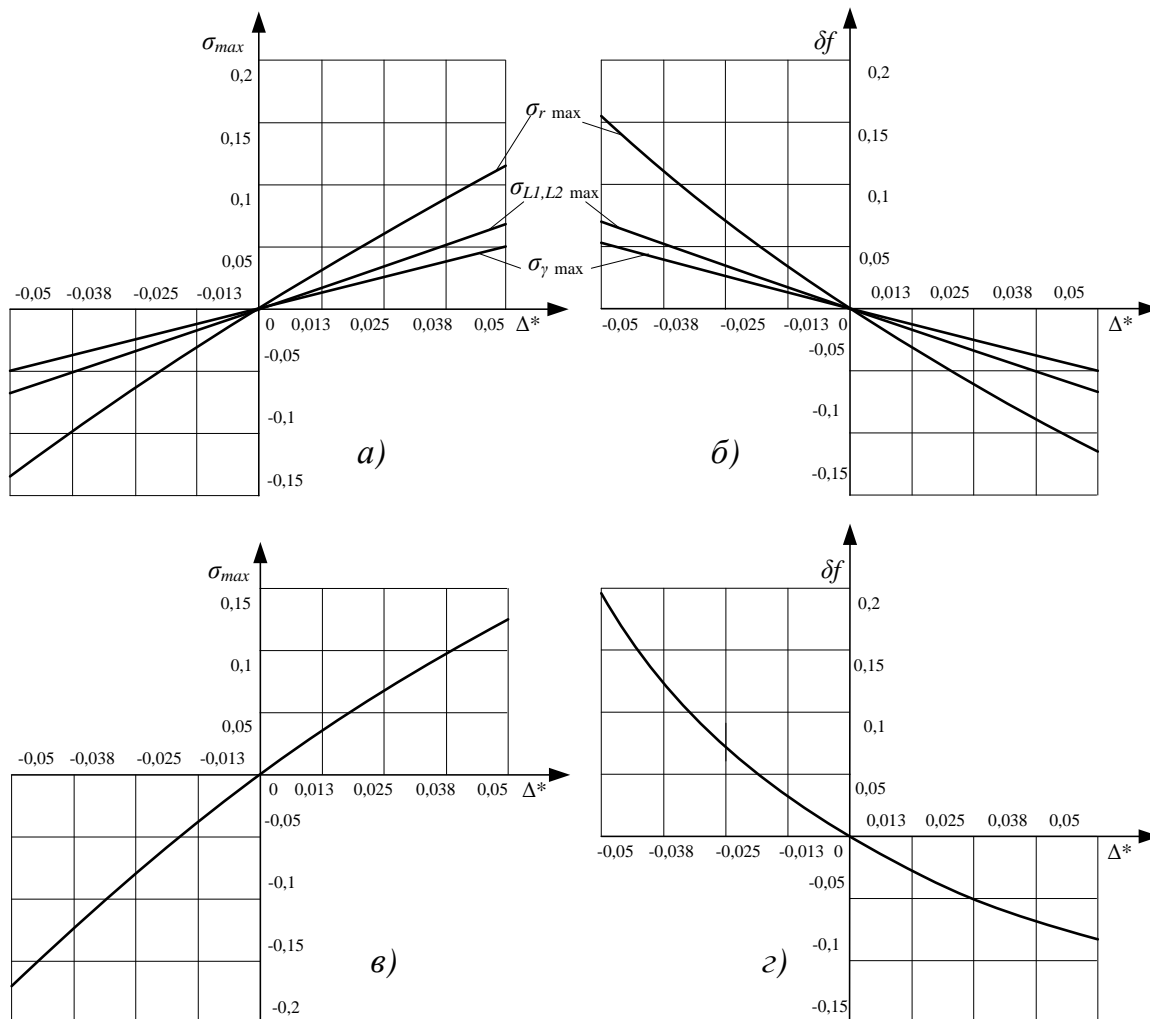


Рис. 4. Результаты исследований влияния технологического разброса основных геометрических соотношений ТПП на точность преобразования

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе обоснованы способы улучшения технических показателей портативного спирометра за счет уменьшения интервалов дискретизации. Кроме того в результате анализа уравнений движения лепестков ротора проведены исследования влияния технологического разброса параметров на результат преобразования, и даны рекомендации по реализации тахометрического фотоэлектрического преобразователя для измерительной части спирометра.

### Литература:

- [1] Enright P.L. Office spirometers: the good, the bad, and the ugly / P.L. Enright, M. Swanney, D. Burton and G. Liistro // The buyers' guide to respiratory care products. – 2007 – 5-18 pp.
- [2] Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. 4-е изд., перераб. и доп. / Панте-

леймон Петрович Кремлевский. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1989. – 701 с., ил.

- [3] Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448с.
- [4] Кипенский А. В. Импульсно-цифровые и цифро-импульсные преобразователи: Учебное пособие / Андрей Владимирович Кипенский. – Харьков: НТУ"ХПИ", 2000. – 132 с.
- [5] Сокол Е.И. Измерительная система современного спирометра и пути ее усовершенствования / Е.И. Сокол, А.В. Кипенский, Е.И. Король, Р.С. Томашевский // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск: «Новые решения в современных технологиях». – Харьков НТУ «ХПИ» – 2009. – №37 – С 22-25.
- [6] Сокол Е.И. Адаптивный метод снижения инструментальной погрешности турбинного датчика в про-

цессе его эксплуатации / Е.И. Сокол, А.В. Кипенский, Р.С. Томашевский, Е.И. Король // «Технічна електро-динаміка» Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.2 – Київ: ІЕД НАНУ, 2010. – С. 265 – 268



**Томашевский Роман Сергеевич**, ассистент кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника» НТУ «ХПИ». Область научных интересов: улучшение характеристик медицинских аппаратуры с помощью микро-процессорных систем импульсного управления.